

【論文】

# Shelf Type 태양열 건조기의 성능평가 Performance Evaluation of a Shelf Type Solar Dryer

이길동 \*    조서현 \*    최영희 \*    이남호 \*    오정무 \*  
K. D. Lee    S. H. Cho    Y. H. Chea    N. H. Lee    P. C. Auh

## ABSTRACT

A shelf type solar dryer of simple design has been constructed and its performance evaluated by KIER (Korea Institute of Energy and Resources). Experimental result, the rate of moisture removal of the dried squid in dryer is higher to that obtained by conventional sun drying. Design modification are suggest to improve its performance.

### I. 서    론

태양열을 이용한 농수산물의 건조는 태양열이 새로운 에너지원으로 대두되기 오래전부터 우리생활에 이용되어 왔다. 그러나 아직까지는 거의 대부분 노천에 곡물을 펼쳐놓아서 직접 태양을 이용하여 건조시키는 원시적인 단계를 벗어나지 못하고 있는 경우가 많다. 이에따라 갑작스런 기후변화로 비나 바람에 의해 불순물로 오염이 되기도 하고 건조중에 착색, 퇴색, 산화등의 화학적변화가 수반되는 경우도 있었다. 또한 이제까지 곡물, 김, 잎담배, 인삼 등의 여러 농수산물 건조는 재래의 화석연료를 사용해온 실정이었다. 그러나 이 농수산물의 건조는 태양열의 저온활용으로써 비교적 손쉽게 적용할 수 있는 분야이므로 가능성이 크고 에너지 절약이라는 관점에서 연구활동이 시급히 요구되는 분야라 하겠다.

태양열을 곡물건조에 이용하려는 연구는 Lipper와 Davis<sup>1)</sup>에 의해 처음 시도된 후 그동안 여러연구자<sup>2,3,4,5)</sup>들에 의해서 Fig.1 처럼 여러가지 형태의 건조기가 연구개

발 되어왔다.

Kranzler<sup>6)</sup> 등은 저온건조방식이 태양에너지를 이용하기 적절한 방식이며 농산물 건조에는 일정한 온도를 유지하여야할 필요가 없기때문에 태양에너지를 사용하는 것이 유리하다고 보고하였으며, Foster, G. H., R. M., Peart<sup>7)</sup>도 농산물 건조는 에너지 절약 및 태양에너지의 이용면에서 볼때 저온건조 시스템이 유리한 것으로 평가하였으며, 또한 곡물건조 비용을 줄이려는 의도에서 태양열 집열기를 곡물건조 뿐만 아니라 난방, 온수급탕등 다목적으로 이용하여야 한다고 발표한바 있다.

T. A. Lawand<sup>2)</sup>는 간단한 Solar cabinet dryer을 제작하여 복숭아, 살구, 포도, 양파등의 건조실험을 수행하여 농촌에 사용 가능성을 제시하였다.

본 연구는 이미 전년도에 한국동력자원 연구소에서 연구개발된 shelf type 태양열 건조 시스템을 개량하여 성능을 향상시키고 물오징어를 건조시켜서 그 성능을 평가하였다.

### II. 건조기구의 기초이론

\* 정회원 : 한국동력자원연구소

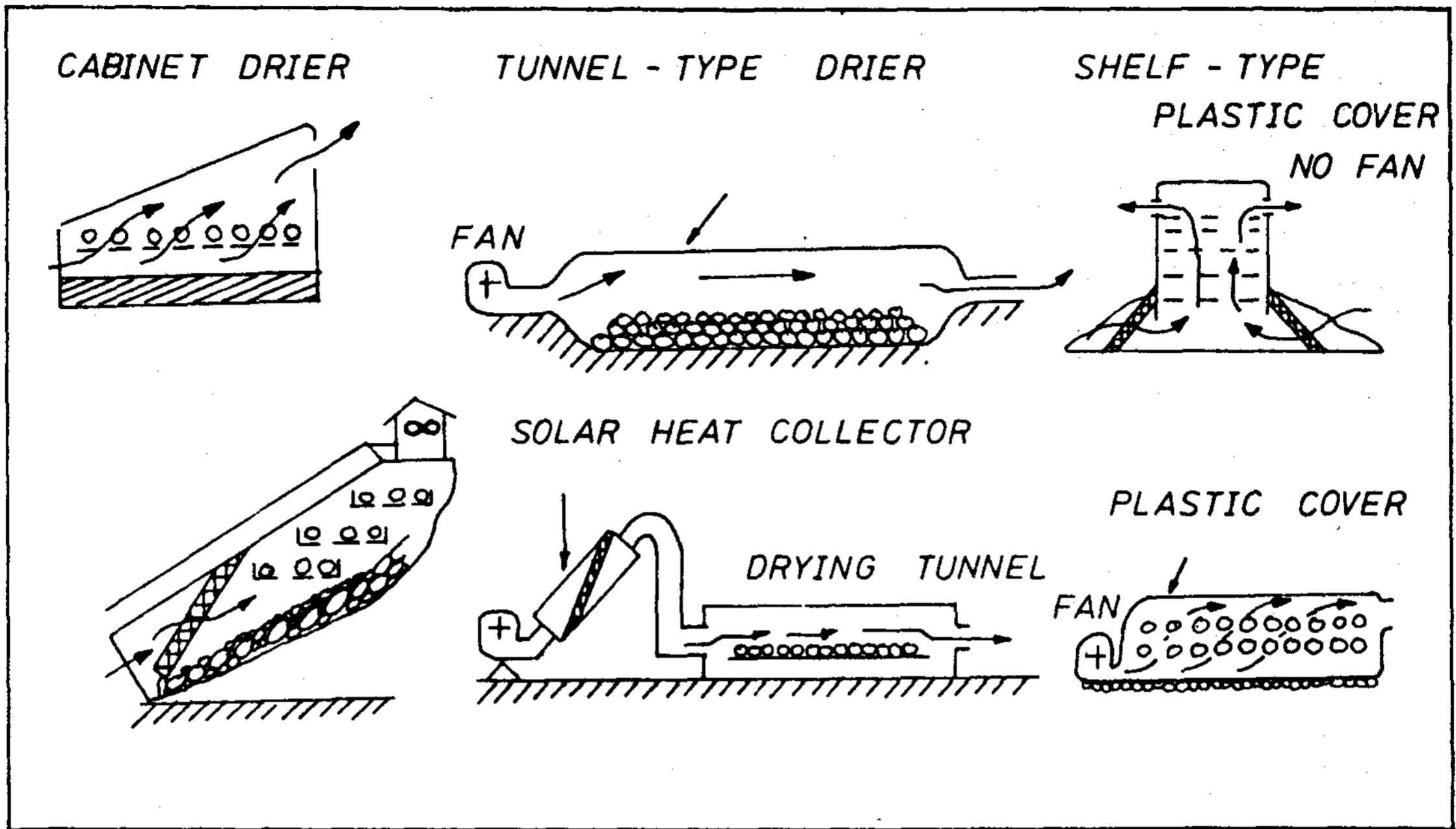


Fig. 1 Solar drying process and various drier designs

고체 (wet solid) 에 열을 가하면 먼저 표면에서 증발이 일어나 고체내부와 표면에 수분의 밀도차가 생긴다. 이때 수분은 밀도가 높은 내부로 부터 밀도가 낮은 표면쪽으로 이동 확산되어 mass transfer가 고체내부에서 일어난다.

물질이 건조되는 동안은 물질의 크기와 기하학적 모양이 현저하게 변한다. 특히 건조되는 동안은 입자의 열적성질이 시간에 따라 변하기 때문에 전도, 대류, 복사의 열전달이 달라지며 심지어는 물질의 색깔 변화는 복사열전달에 큰 영향을 미친다. 따라서 건조되어지는 물질의 열적특성은 서로 전부 다르기 때문에 일반적인 건조방식을 얻는 것은 어렵지만 관련된 기본 건조이론은 거의 같다.

최근 Suzuki, Keey, Maeda 8,9) 등이 수치해석적인 방법으로 이 문제를 해결하기 위해 시도 한바 있다. 고체 (wet solid)가 건조되는 동안 mass transfer는 고체 내부에서 수분의 이동 및 표면에서의 수증기의 이동에 의해 일

어난다. 표면에서의 수분이동은 Fick's의 법칙으로 표현되며, 입자내 unsteady한 수분의 분포는,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

로 적을 수 있다.

여기서  $\phi$ 는 free moisture concentration ( $kg/m^3$ ),

$t$ 는 시간 (sec),  $D$ 는 diffusivity ( $m^2/sec$ ) 이다.

항울건조기간 동안 초기조건과 경계조건은

$$\phi = \phi_i \quad \text{at } t=0 \dots \dots \dots (2)$$

$$D \frac{\partial \phi}{\partial x} = N_i \quad \text{at } x=0 \text{ (surface)} \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = \frac{b}{2} \text{ (mid-section for an axi-symmetric solid)} \dots \dots (4)$$

가 된다.

여기서  $N_i$ 는 initial relative drying intensity,  $b$ 는 고체의 두께 (m) 이다.

free surface-wet moisture 을 가지는 물질은 이 기간동안에는 증발은 고체표면에서 일어나며 surface-wet 는 고체내부의 internal mechanism 에 무관하다.

건조율은 반드시 액체의 증발이며 고체에서는 온도와 유량변화의 조건에서도 증발되지 않는다. 단순히 항울건조 기간동안에는 건조율은 heat 과 mass transfer 계수, 건조되는 고체의 표면적, drying medium 과 고체 (wet solid) 표면 사이의 온도와 습도 차이에 따라 달라진다.

항울건조 기간은 식(1)과 식(4)에 경계조건  $\phi(x=0, t=t_c) = \phi_c$  (at the surface) .....(5)을 적용하여 풀면 그 기간을 추측할 수 있으며, 이때 critical 수분함유량의 평균치를 정의하여 mass balance 는

$$\phi_c = \phi_i \left( 1 - \frac{N_i \cdot T_c}{\phi_i \cdot b} \right) \dots\dots\dots (6)$$

로 적을 수 있다.

고체 (wet solid)에서는 맨 처음 일정한 증발이 일어난후 그 다음에 점차적으로 건조율이 감소된다. 이때 건조율이 감소되는 기간을 감울건조 기간이라 한다.

이 경우에 있어서는 evaporation zone 은 물질속으로 수축되어 이상적인 receding evaporation plane 이 된다.

이때 초기조건과 경계조건은

$$\phi = \phi(x, t = t_c) \text{ (initial moisture profile) } \dots\dots\dots (7)$$

$$D \frac{\partial \phi}{\partial x} = f \cdot N_i \text{ at } x = \phi(t) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \text{ at } x = \frac{b}{2} \dots\dots\dots (9)$$

가 된다.

여기서 f는 특정 건조율이다.

evaporating plane  $\phi$ 의 길이는 다음의 식에 의해서 지배된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = - \frac{2D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{x=\phi}}{\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=\phi}} \dots\dots\dots (10)$$

식(10)을 사용하면 식(1), 식(9)는 evaporating plane 의 길이를 추정할 수 있게한다. f와  $\phi$  사이의 간단한 상관관계는 Suzuki와 Maeda<sup>8,9)</sup>에 의해서 유도되었으며, 그 결과는

$$f = \frac{1}{1 + \theta_i (\phi/b) \cdot \tau} \dots\dots\dots (11)$$

로 적을 수 있다.

여기서  $B_i$ 는 Biot 수이며

$$B_i = kb / \lambda \dots\dots\dots (12)$$

로 표현된다.

$\tau$ 는 evaporation-resistance 계수

k는 표면열전달 계수 (Kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

$\lambda$ 는 열전도 계수 (Kcal·m·h·°C)이다.

한편 Fig. 2는 건조 특성을 나타내었는데, 여기서 맨 처음 영역은 warming-up 부분이고 두번째 부분은 항울건조 기간이다. 마지막 부분은 감울건조 기간이다.

상업용 건조기에서는 이러한 sharp한 변화는 일어나지 않지만 점선처럼 smooth한 곡선으로 나타낸다. 건조과정중 상당한 수축이 일어나는 동안에는 고체내부에 형성된 압력 구배는 건조 기구에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

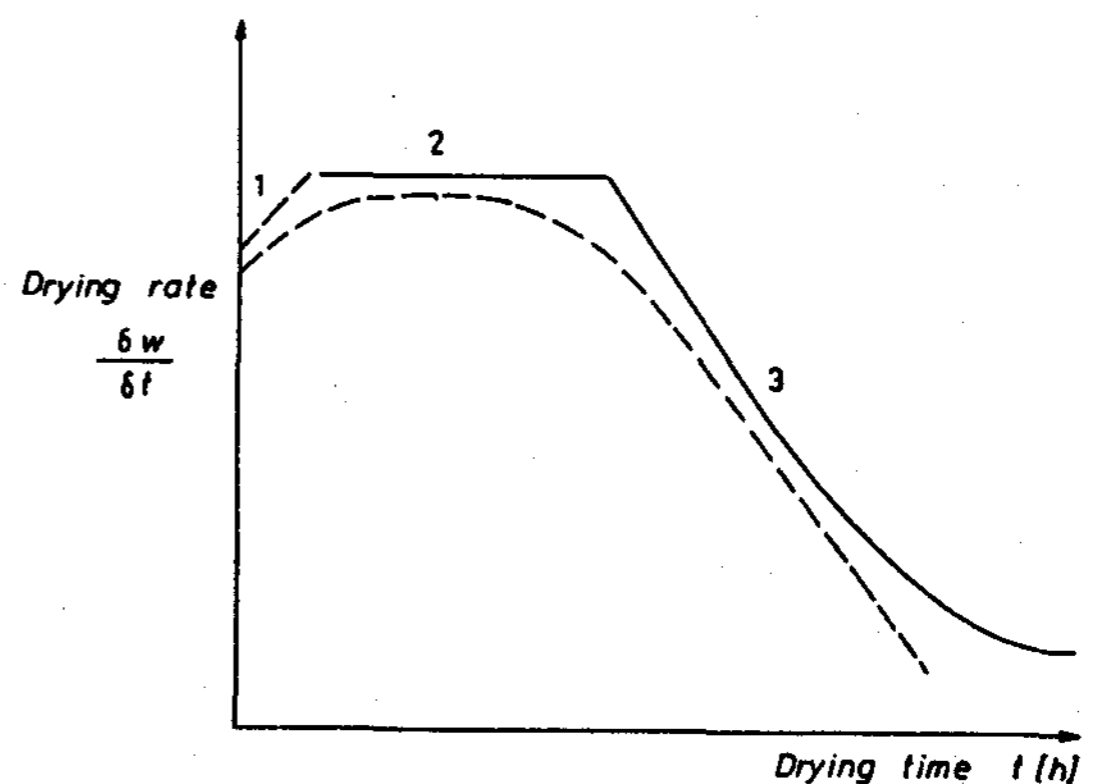


Fig.2 A typical drying sequence

### III. 실험장치 및 방법

태양열 건조시스템의 제작 및 열적성능 측정방법에 대해서는 전년도에 이미 상세하게 발표되어 있으므로 10) 간단히 소개하면 다음과 같다.

본 실험에서는 성능을 향상시키기 위해 공기식 집열기의 집열면적(3×4m)을 크게하고 건조실 내부에 온도 제어장치를 부착시켜 건조실의 온도에 따라 송풍기가 자동적으로 on-off 되게 개량하였다.

물오징어 건조실험은 청명한날 6월중 10시

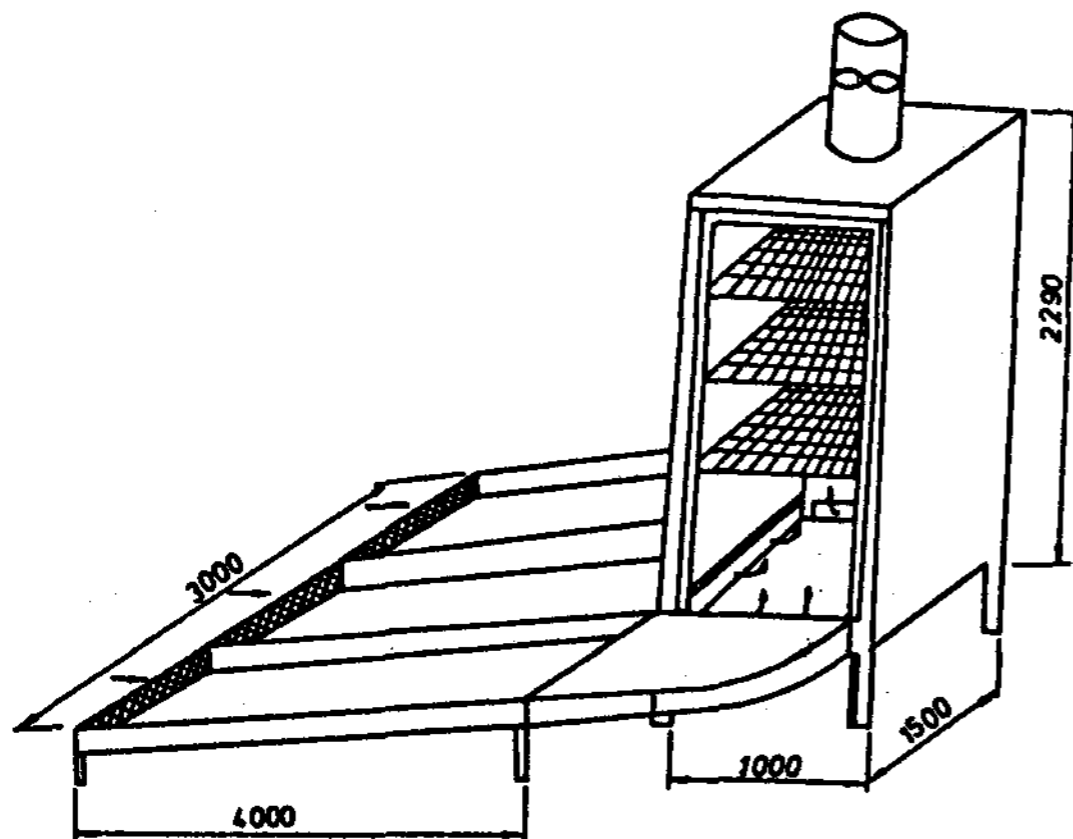


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

경에서 18시경까지 실시했으며 실시결과는 실험조건과 외기조건이 다르기 때문에 시간에 따른 온습도와 태양 복사에너지 강도 변화로 표시하였다.

이때 측정은 HP 9825 T computer, HP3054 Automatic data Acquisition system를 이용하여 수행되어졌다.

Fig.3에는 설계제작된 건조시스템의 개략도가 나타나 있고 Fig.4에는 설치되어 운영되고 있는 건조시스템의 모형을 사진으로 나타내었다.

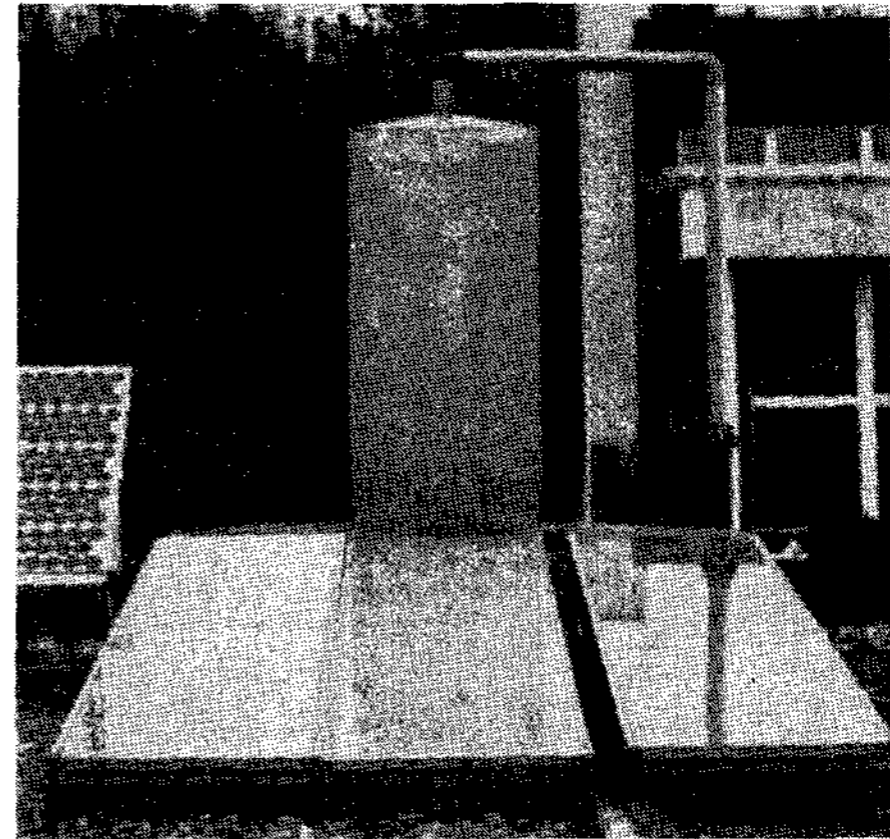


Fig.4 Photography of solar dryer

### IV. 결과 및 분석

Fig.5, Fig.6은 자연대류와 강제대류에 의한 공기식 집열기의 출구온도, 외기온도 및 태양복사 에너지 강도 변화를 각각 나타내었다. Fig.6에서 집열기 출구 최고온도는 80℃를 나타내어 식품에 손상을 줄 가능성이 크다. Fig.5에서는 유량 160 Nm<sup>3</sup>/h으로 흘릴때 집열기의 출구온도는 최고 50℃정도로 낮게 나타났다.

태양열을 이용한 농·수산물의 건조는 저온에서 유량의 속도를 빠르게 하여 건조<sup>3)</sup>시키는 것이 바람직하므로 자연대류 보다는 강제대류가 보다 유리함을 알 수 있다.

Fig.7에는 물오징어를 건조실에 넣어서 유량 400 Nm<sup>3</sup>/h에서 건조시킨 시스템 성능의 실험결과를 나타내었다. 그림에서 건조가 진행되는 동안 건조실의 습도는 오전 10시경 최고 60%, 오후에는 20% 정도로 낮게 나타났으나 외기습도는 55~80% 정도로 높게 변화하였다. 한편 외기온도는 24℃-32℃로 변하고 건조실의 온도는 최저 30℃에서 최고 53℃까지 변화하였다.

대체로 건조실의 온도는 집열기에 의한 온도상

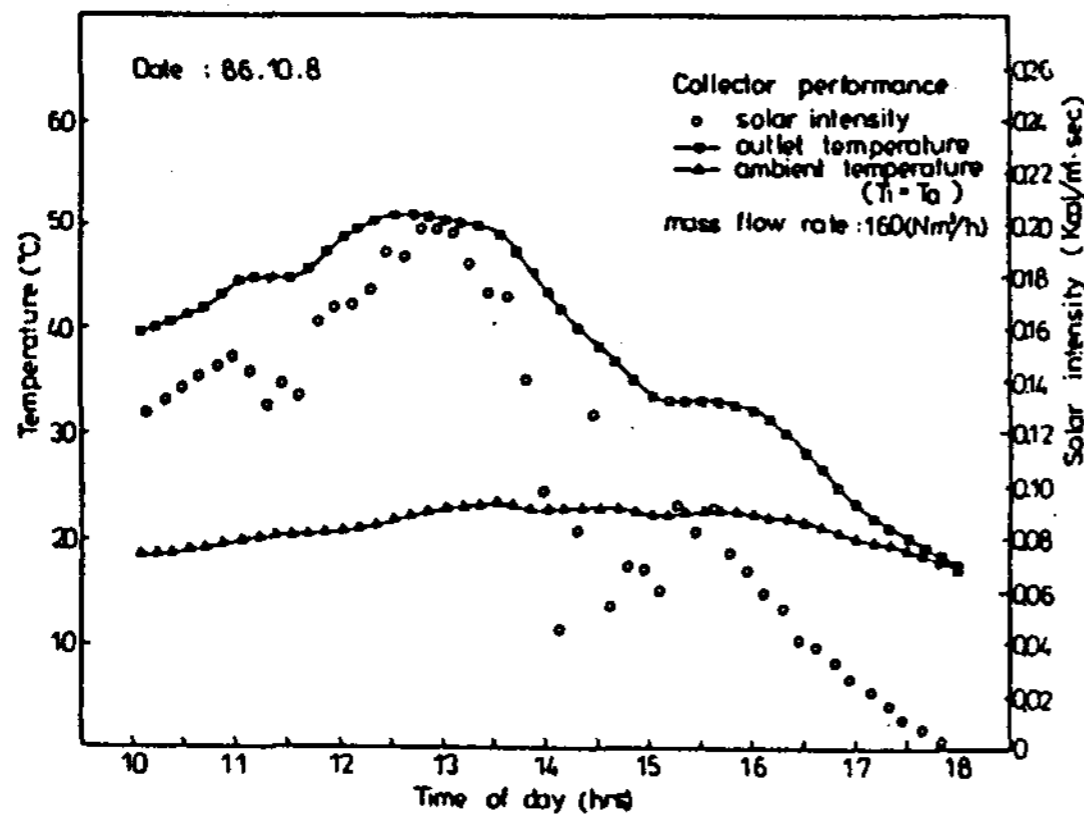


Fig.5 Air collector performance by a forced convection

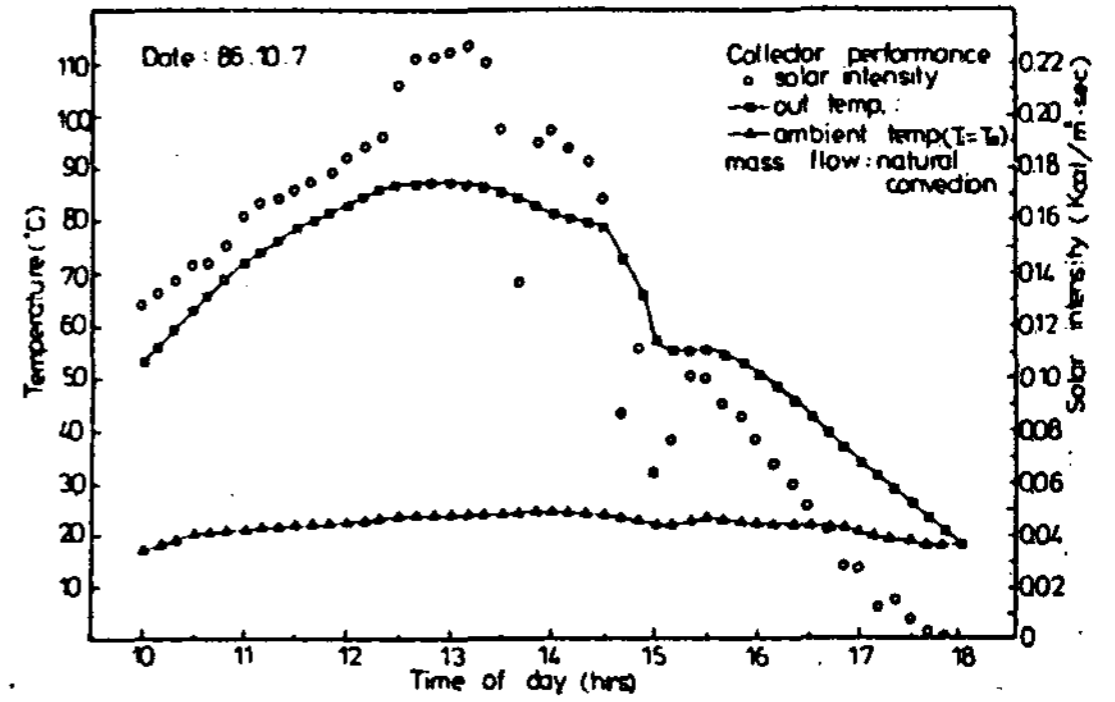


Fig.6 Air collector performance by a natural convection

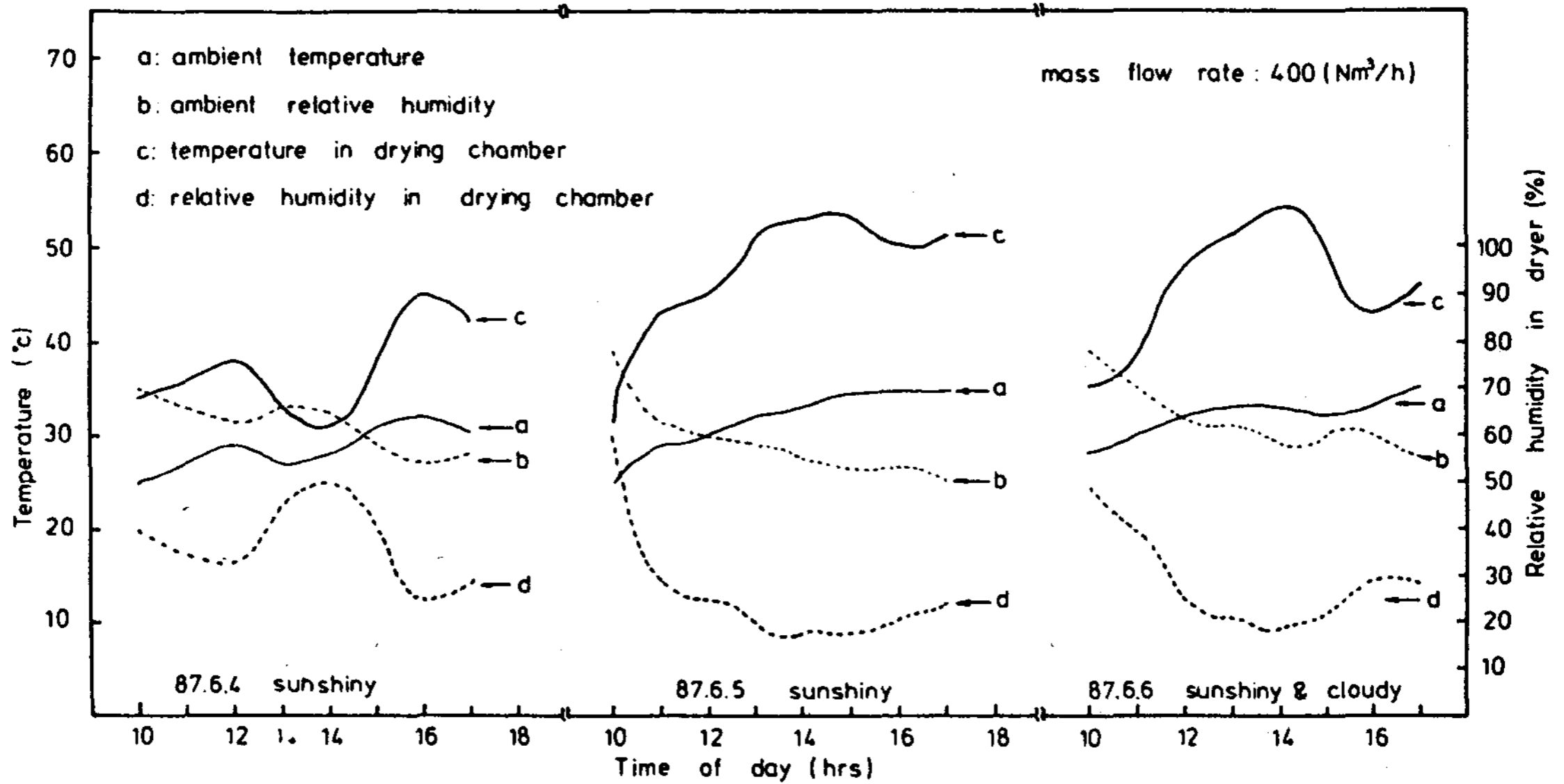


Fig.7 Drying chamber performance during squid drying

승 효과때문에 외기온 보다 상당히 높고 습도는 낮았다. 그리고 건조실의 온도는 외기온 보다 오후에는 최고 20℃정도 높았다.

이것은 Bauman,<sup>11)</sup> Buelow,<sup>12)</sup> Lipper<sup>13)</sup> 등이 지적한 것 처럼 태양열의 저온활용이 가능함을 보여준다.

Fig.8은 건조되는 동안 외기조건(수평면 일사량, 외기온도)의 변화를 나타냈으나 6월 4일 일사량 변화가 Sine 곡선으로 나타난것은

오후 1시-3시경 구름이 끼어 일사량이 급격히 감소하여 다시 증가했기 때문이다.

Fig.9은 건조실이 텅빈(no-load) 이상적인 상태에서 유량 400Nm<sup>3</sup>/h로 흘러면서 건조실의 온도변화를 나타낸 것인데 최저 30℃, 오후 3시경 최고 60℃를 나타내었으며 이때 외기온은 25℃-32℃까지 변화였으며 일사량은 오후 1시경 최대치에 도달했다. Fig.7의 건조실의 온도는 Fig.9와 비교해보면 물오징어

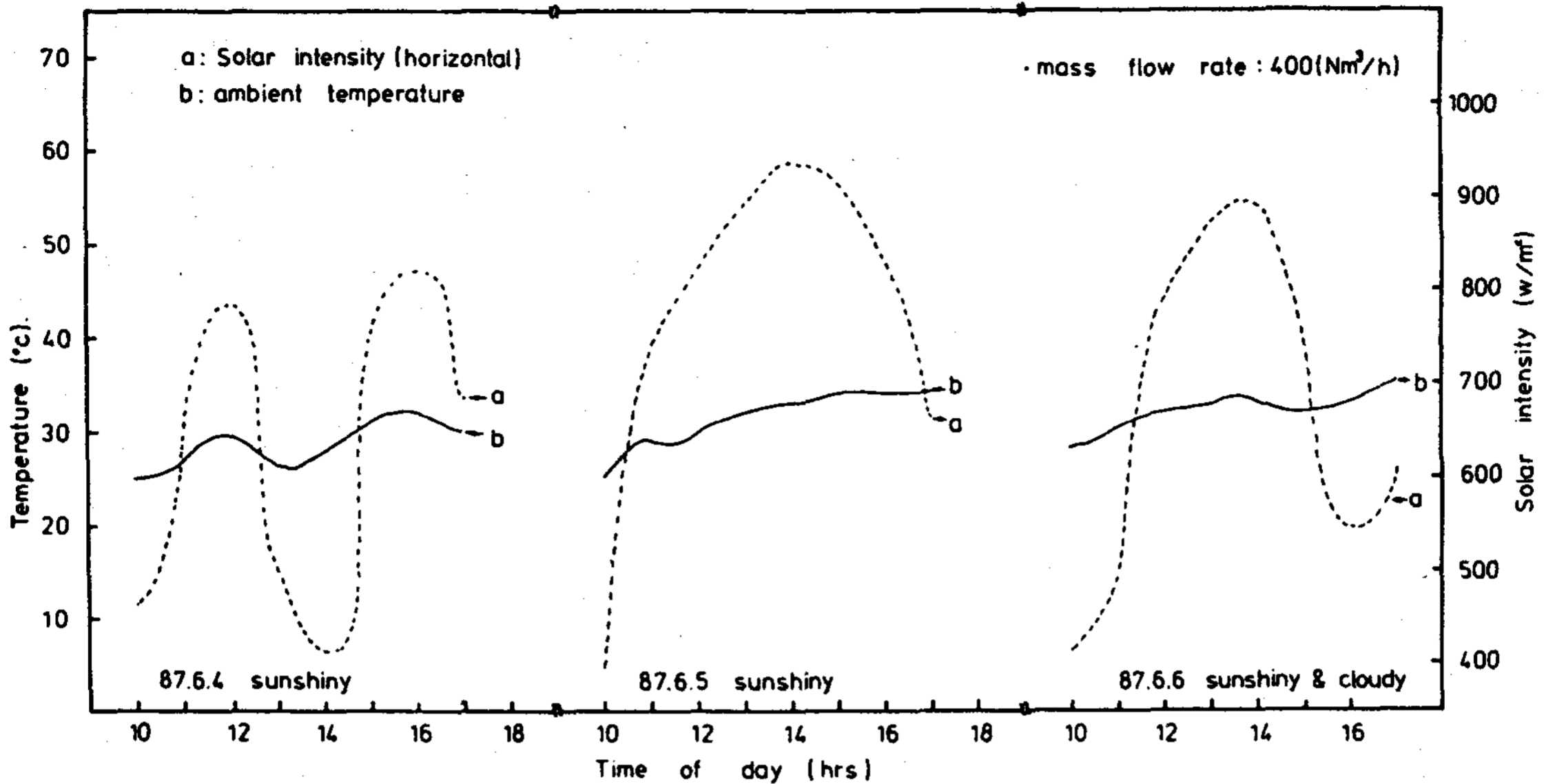


Fig.8 Weather conditions during drying operation.

를 건조실에 넣지 않았을 때의 온도보다는 약 7°C가 낮았다.

이것은 집열기에서 가열된 공기가 대부분 물오징어의 수분을 증발시키는데 열이 소모되었기 때문이다. 즉 증발잠열에 따른 열흡수 때문이다. Table 1은 물오징어를 건조기에서 3일간 건조시킨 결과를 나타낸 것이다. 유량 400 Nm<sup>3</sup>/h으로 집열기를 통과시켜 가열된 공기로 건조시킨 후 건조실의 수분은 무게 감소로 보아 최초무게의 85.5%인데 비하여 천연건조 (Sun dry-

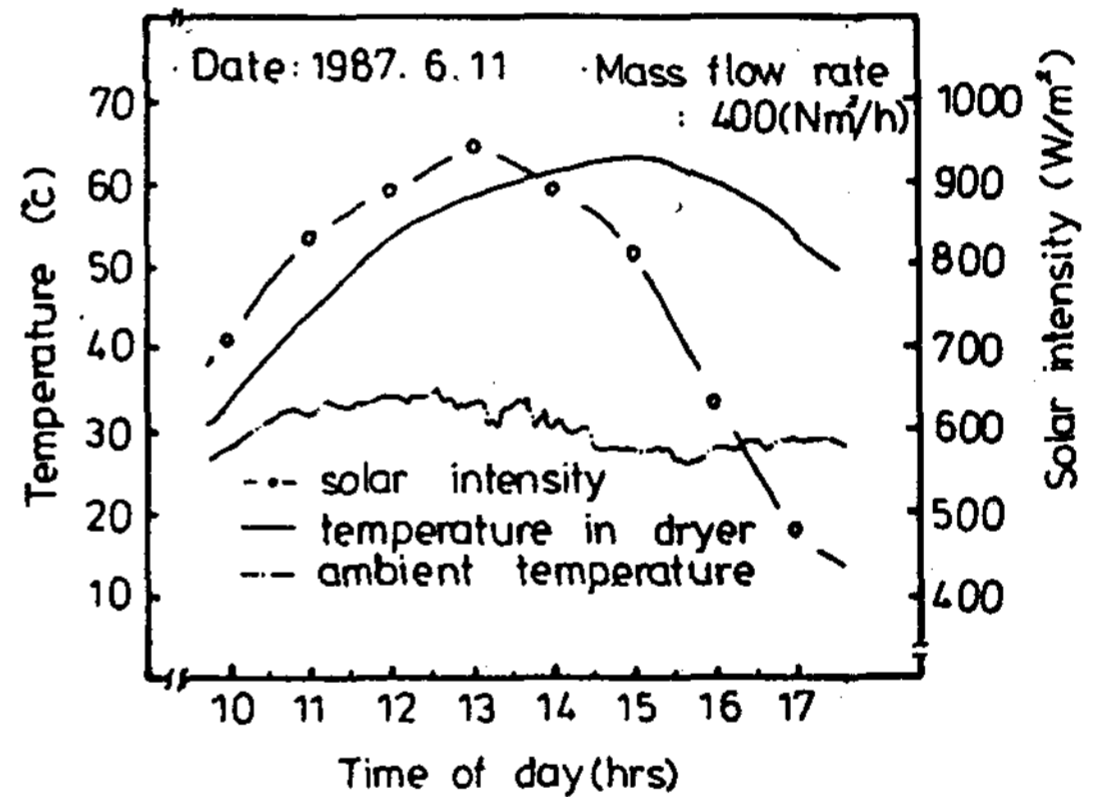


Fig.9 Drying chamber performance at no load

Table.1 Result of squid drying experiment (air mass flow 400 Nm<sup>3</sup>/h)

Date	Time of drying	Weight of squid(g)		Drying rate (%)		Weather
		natural drying	solar drying chamber	natural drying	solar drying chamber	
87. 6. 4	10:00 (initial)	6385	12588	35.47	47.49	sunshiny
	17 00 (final)	4120	6610			
6. 5	10 00 (initial)	3780	6306	47.62	54.49	sunshiny
	17 00 (final)	1980	2870			
6. 6	10 00 (initial)	1951	2835	24.60	35.66	sunshiny & cloudy
	17 00 (final)	1471	1824			
87. 6. 4 — 6. 6		6385 - 4914 = 1471	12588 - 10764 = 1824	76.96 (total)	85.51 (total)	

ing) 시킨 경우는 77%였다. 건조시스템을 사용하여 건조시킨 경우 천연건조보다 9% 정도 빨리 건조되었다.

### V. 결 론

이상의 실험 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 건조실에서 물오징어를 유량  $400 \text{ Nm}^3 / \text{h}$  에서 3일간 건조시킨 결과 건조기에서 제거된 수분은 최초 무게의 86%였으나 천연 건조는 77%였다.
2. 농수산물에 태양열 저온 활용은 자연대류보다 강제대류형의 건조기가 적합함을 알 수 있었다.
3. 앞으로 집열기의 성능을 향상시키기 위해서는 태양선택 흡수면의 개발이 필요하다고 사료된다.

### REFERENCES

1. Lipper, R.I. and C.P. Davis. solar energy for crop conditioning paper No. 59-902. Am. Soc. Agr. Engin. St. Joseph, Mich. 1959.
2. T.A. Lawaul, "A Solar-Cabinet Dryer", Solar Energy, Vol. 8, No. 4, PP. 158-164, 1966.
3. T.A. Iawand, "The Potential of Solar Agricultural Dryers in Developing Areas".
4. H.P. Garg. P.C. Pandey & K.P. Thanvi "Development of a Solar Agricultural Dryer", Paper NSEC, Doc. 78.

5. Lof. George O.G. "Solar Energy for Drying of Solid", Solar Energy vol. 4, No. 4, PP. 122-128, 1966.
6. Kranzler, G.A. etal "Grain Drying with Supplement Solar Heat", Transactions of the ASAE. PP. 214-217, 1980.
7. Foster, G.H. and R.M. Peart. 1976. "Solar Grain drying Progress and Potential", USDA, Agricultural Research agriculture Information Bull. No. 401.
8. Suzuki, M. and S. Maeda Japan Heat Transfer Symposium III. PP. 166, 1966.
9. Suzuki, M., Keey, R. and S. Maeda, "On the characteristic Drying Curve". Aiche J., vol. 73, PP. 47-56, 1977.
10. K.D. Lee, N.H. Lee & P.C.M. Auh, "Experimental study of a solar Drying System". J. Solar Energy Society of Korea Vol. 9, No. 1, 1987.
11. Bauman, B.S., M.F. Finner, and G.C. Shove. "Low Temperature Grain Drying with Supplemental Solar Heat from an Adjacent Metal Buieding, Paper No. 75-3514, 1975.
12. Byelow, F. and James boyd. "Heating Air by Solar Energy" Agricultural Engineering Vol. 38, No. 1, PP. 28-30, 1957.
13. Lipper, R.I. and C.P. Davis "Various Uses Possible for New Solar Heat Collectin Agricultural Research. Vol. 10, No. 5, PP. 14, 1961.